第40卷 第2期
2023年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 2
Feb. 2023

毛乌素沙地流动沙丘不同沙障组合措施的防风固沙效益评价

石 麟[1]， 李红悦[2]， 赵雨兴[1]， 任余艳[1]， 何金军[1]，
于凤强[3]， 哈斯额尔敦[4]

（1. 鄂尔多斯市林业和草原科学研究所，内蒙古 鄂尔多斯 017010；2. 北京市广渠门中学，北京 100001；
3. 鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心，内蒙古 鄂尔多斯 017010；4. 北京师范大学地理科学学部自然资源学院，北京 100875）

摘 要： 为了解毛乌素沙地沙柳再生沙障、聚乳酸(PLA)沙袋沙障和草绳沙障配置固沙植物种组合措施下的防风固沙效益，通过对各类组合措施下不同高度处风速、近地表输沙量、障内蚀积形态的测定，对比分析了不同材料、坡位、规格下几种沙障组合措施的防风固沙效益。结果表明：(1) 1 m×1 m规格沙柳再生沙障、草绳沙障组合措施下降低近地表风速效能最大，可达80.29%、78.49%，3 m×3 m规格的草绳、PLA沙障组合措施下防风效能仅为58.14%、57.88%；(2) 输沙率降低率表现为：沙柳>草绳>PLA，且呈随规格增加而减小的趋势，其中沙柳再生沙障组合措施阻沙效果较稳定，其他2种稳定性较差；(3) 各类措施下障内微地形主要受NW~NNW风向控制，不同类沙障材料障内形态特征不同，整体以侵蚀为主，草绳沙障组合措施障内相对侵蚀深度最大，PLA沙障措施下次之，沙柳沙障措施下表现为以-10~5 cm区间侵蚀深度范围为主的弱蚀积状态，但相对侵蚀深度范围均呈随规格增大、坡位增加而减小的趋势。综合分析认为，沙柳再生沙障配以撒播固沙植物种的人工固沙植被体系最为稳定，防风固沙效益最优，为毛乌素沙地较为适宜的流动沙丘沙障促进植被恢复治理技术措施，其余组合措施可视沙障材料获取难易、运输条件以及流沙环境和治理目的适当采用。

关键词： 流动沙丘；沙障；组合措施；防风固沙；毛乌素沙地

沙障固沙是沙区广泛采用的一种能有效固定流沙和促进植物固沙的必要措施。基本原理是通过影响下垫面结构和性质，减少风沙流通量和改变地表蚀积状况等，从而起到快速固定流沙的作用[1]。沙障技术的应用最初为满足沙区铁路、公路和高压线等维护需要[2-3]，后来被广泛应用于沙漠化治理中。沙障材料的选择和布设首要考虑防风固沙效益外，还要取决于各种材料获取程度的难易，区域自然条件、施工难易及沙障成本等综合因素。沙障材料主要包括生物沙障和机械沙障两大类。毛乌素沙地因其水热条件较好，多年来一些优良固沙灌木树种和多年生草本植物常被用作植物再生沙障应用于防沙治沙中，其中最具代表性的为沙柳沙障和沙蒿沙障。董智等[4-6]对沙柳沙障设置规格、设置方式、防风固沙效益进行了系统的研究。草方格沙障因其成本低廉，是早期流沙治理的首选，也是目前国内应用范围最广，最具代表性，研究最为深入的沙障类型[7]，2013年以来，鄂尔多斯水利局改进麦草设置方式，以网格麦草编织草绳铺设的方式在毛乌素沙地进行了探索和实践，并在同类地区进行了大面积推广[8]。另外，随着材料科学的发展，各种新型材料如PLA可降解纤维沙障、纱网沙障逐渐也被应用到毛乌素流沙固定工程中，众多学者[9-13]对沙障单一初设后的防护作用、阻沙效果进行了深入的研究，通过相应野外观测[14-16]和等比例实体沙障风洞流场模拟[17-18]对沙障各方面防护机理、地表蚀积

收稿日期： 2022-06-24； **修订日期：** 2022-11-28
基金项目： 国家重点研发计划课题(2016YFC0500805)；科技兴蒙重大专项课题(KJXM-EEDS-2020006)
作者简介： 石麟(1982-)，女，硕士，副高级工程师，主要从事荒漠生态学研究. E-mail: shilin_323@163.com
通讯作者： 哈斯额尔敦. E-mail: hasi@bnu.edu.cn

特征及障内蚀积形成的风沙流场过程进行了分析。结果表明,各类沙障均起到有效的防风固沙效应。但长期实践证明,单一的沙障措施下常出现沙丘活化速率加快、植被恢复较慢、沙障破损度期缩减的问题。又开展了对沙障布设方式的研究,但大多侧重于通过野外观测、风洞试验[19-20]与数据模拟[21]等设障高度、设障间距、防护距离间的配置优化研究。区域性沙漠化土地治理经验证明,因地制宜选择沙障的基础上再配置固沙植物种的优化措施更行之有效。此外,沙障环境对气流、风沙及植被空间分布的再分配已得到了比较全面的定性认识,学者们[22-23]认为,将机械沙障与生物措施相结合,更能有效提高流沙治理的效率,以促进植被的良性生长和沙地生态系统的恢复。且沙障铺设后对提高植被恢复速率也有所不同[24-26],但目前对机械沙障与生物固沙配置组合措施下的防风固沙效益与形成的地表形态反馈研究较为匮乏。

本文以毛乌素沙地腹地鄂尔多斯乌审旗图克镇梅林庙嘎查为试验地,以当地扦插萌孽性较强、资源丰富的沙柳再生沙障、水利工程常用的草绳沙障,以及近年新兴的PLA纤维沙障为基础,障内再配置当地适应性较强的先锋固沙植物种的措施,开展各类沙障组合措施下的防风固沙效益对比研究,以期为区域大面积的防风固沙工程提供决策依据。

1　研究区概况

研究区为地处毛乌素沙地腹地的内蒙古自治区乌审旗东北部的图克镇沙区(38°53′26″~38°53′47″N,109°13′47″~109°14′23″E;图1)。地表景观以新月形沙丘及新月形沙丘链为主,沙丘走向呈NE~SW向,高度一般在数米至十余米,迎风坡较缓,坡度约5°~20°;背风坡较陡,坡度约25°~35°。该区属半干旱季风气候区,冬季干冷多风,夏季炎热少雨,年均气温7.2 ℃,年降水量为379 mm,蒸发量2113 mm,年均风速3 m·s^{-1},3—5月风沙活动频繁[27]。研究区植被主要以沙生植被为主,主要有油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙米(*Agriophyllum pungens*)、虫实(*Corispermum* L.)、沙竹(*Psammochloa villosa*)、沙柳(*Salix psammophila*)、羊柴(*Hedysarum laeve*)等沙生植物。

2　材料与方法

2.1　试验材料

试验采用沙柳、草绳、PLA(聚乳酸纤维)3种沙障材料(图2)。沙柳沙障选用具有再生能力的一、二年生沙柳活枝条;PLA沙障是一种新型生物基可降解纤维管状沙障,以木薯、淀粉等生物质为原料制成的一种高分子圆筒管状织物,管径约8~10 cm;

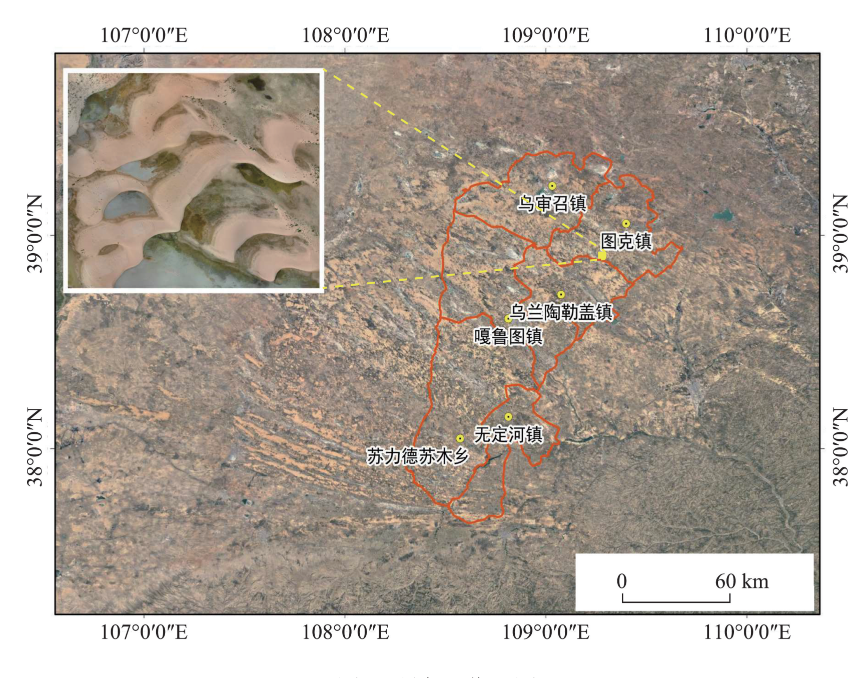


图1　研究区位置图

Fig. 1　Location map of the study area

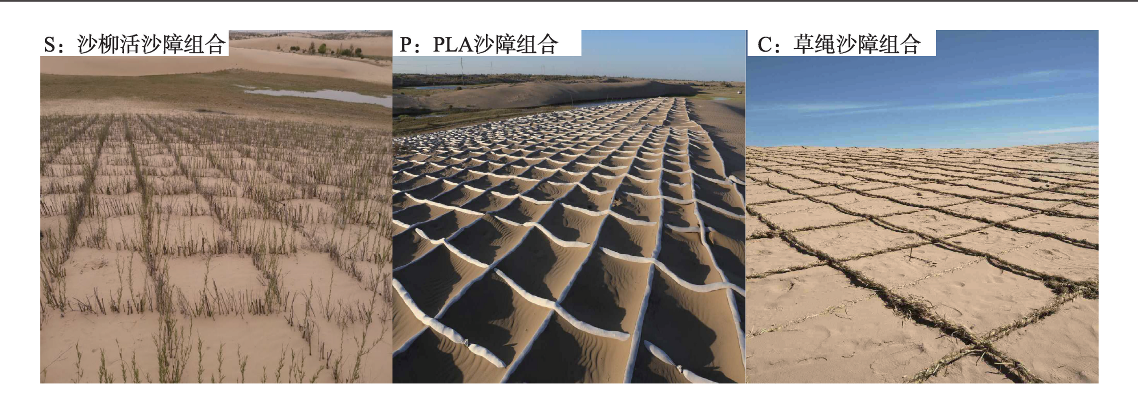


图2 沙障组合措施初设效果

Fig. 2 Laying effects of sand barrier combination

草绳沙障材料为麦草，采用麻花编织法将其编织成单根直径2.5 cm草绳，再将两根拧为一根使用。

2.2 研究方法

2.2.1 试验布设 2017年10月下旬植被渐进休眠期，选取大小、走向、坡度相近且周围无障碍的独立平缓新月形流动沙丘(植被盖度小于5%，坡度<15°，坡长15~20 m)，在其迎风坡按东西走向与流动沙丘南北走向垂直，分别在3个独立的沙丘上分别布设沙柳S1(1 m×1 m)、沙柳S3(3 m×3 m)、PLA P1(1 m×1 m)、PLA P3(3 m×3 m)、草绳C1(1 m×1 m)、草绳C3(3 m×3 m)共6种组合格状沙障，根据新月形流动沙丘特征，沙障主要布设在沙丘迎风坡坡脚至丘顶约4/5的范围，沙丘顶部一般不设置沙障，主要利用风的削蚀作用，把沙丘顶部削平缓，恢复自然植被，既起到防风固沙效能又起到节约材料成本的效果，为降低相邻沙障和地形间的影响，布设相邻规格沙障时中间间隔5 m裸沙区。沙障设置的基础上，为促进植被快速恢复，采用沙障与固沙植物种组合的优化措施，于2018年雨季前后在障格内撒播一定比例的杨柴(*Hedysarum laeve*)、大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)固沙植物种，后植被保持自然恢复，2019年春季开展风沙观测试验。

沙柳沙障采用现砍现栽扦插栽植的方法，将所取沙柳截断，地面留高20 cm，埋深30~40 cm，沙障孔隙度50%~60%，翌年成活率可达45%~55%；草绳沙障障高6 cm，直接平铺于沙面，交叉处用沙柳条扦插固定；PLA沙障将沙袋一端打结，从另一端将流动风沙土填充到袋内，边装边沿线平铺，障高8 cm。

同时选取附近裸沙丘为对照区，以下简称对照。分别对不同规格实验区进行风沙观测(采用HOBO风速仪和阶梯式集沙仪观测)和障内微形态测定(图3)。

2.2.2 防风效能测定 在S、P、C组合沙障沙丘分别选择迎风坡坡中水平方向同坡位沙障障格中心平行架设HOBO风速仪，其中对照沙丘相应高度、旷野2 m高度始终同步观测，风杯设置0.1 m、0.3 m、0.5 m、1 m和2 m共5个高度，数据采集间隔时间为10 s，所测风速为瞬时风速，每一部位测定时间根据风力大小及风向稳定性进行调整，观测时间20~30 min，取其连续10 min为1组数据，观测期间风向风速见图4。观测期间，空旷地风向介于NW~NNW之间，风速范围4~14 $m\cdot s^{-1}$。其中NNW风所占频率比例最大(43.75%)，平均风速8.94 $m\cdot s^{-1}$，NW方向次之(39.20%)，平均风速9.17 $m\cdot s^{-1}$。

利用所获风速计算防风效能，防风效能计算公式如下：

$$Eh = (Vh_0 - Vh)/Vh_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中：Eh表示高度为h处防风效能(%)；Vh_0表示对照沙丘高度为h_0处平均风速($m\cdot s^{-1}$)；Vh表示沙障内高度为h处平均风速($m\cdot s^{-1}$)。本试验选取对照沙丘200 cm高度风速(h_0)作为基准。

2.2.3 输沙量测定 短期风蚀观测选择在风速测定的同时，在各沙丘的中上坡与下坡3种材料不同规格的障格中心布设20 cm高度的阶梯式集沙仪，积沙盒间隔2 cm(共10个积沙盒)，积沙口面积为2 cm×2 cm，积沙仪内置10个积沙筒分别连接10个入口，对不同沙障材料措施下垫面的输沙量进行同步对比观测，达到试验风速开始计时，每次观测10 min，共3组平行实验。采集的沙物质样品进行称重(精度为0.001 g)，从而获得输沙量数据[28]。

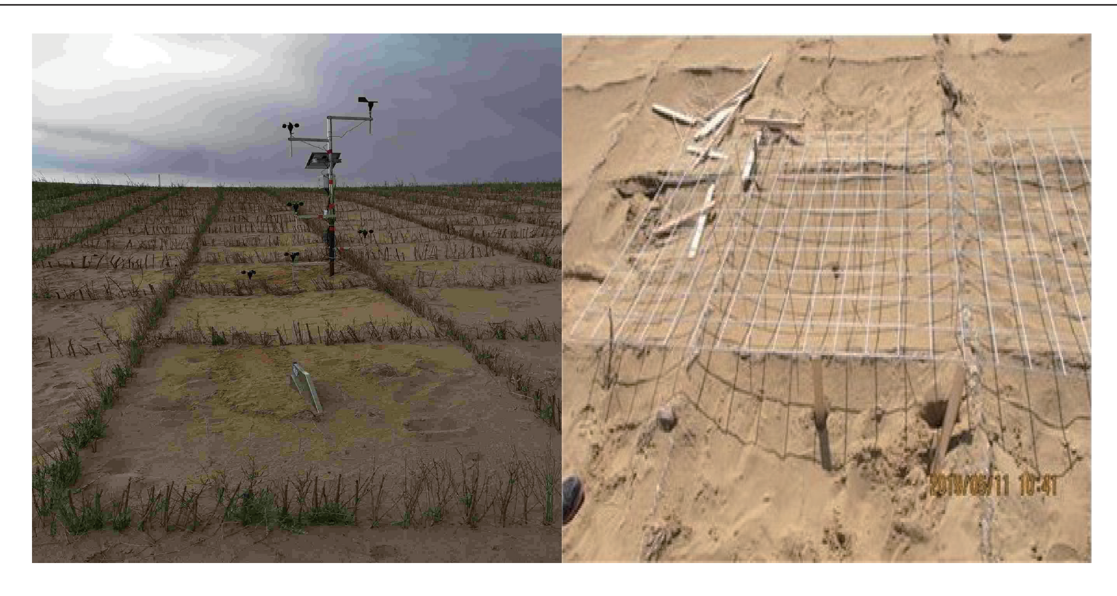


图3 风速、积沙、障内微形态测定现场

Fig. 3 Site for determination of wind speed sand transport rate and barrier shape in field

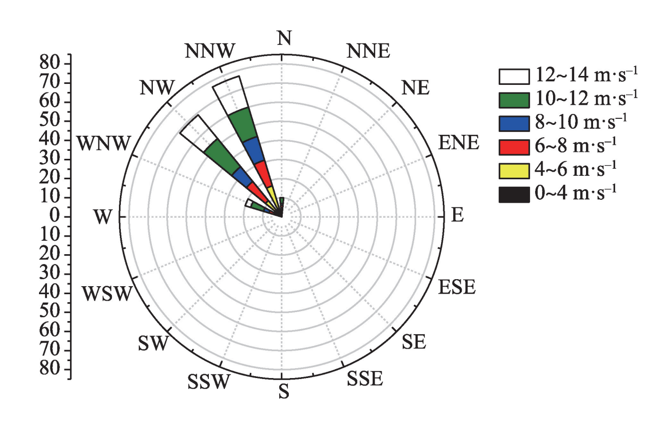


图4 观测期间风向风速频率玫瑰图

Fig. 4 Wind rose diagram during observation

输沙量降低率计算公式如下:

$$\Delta Q = (Q_0 - Q_t)/Q_0 \times 100\% \qquad (2)$$

式中:ΔQ为输沙量降低率(%);Q_0为对照裸沙丘同部位输沙率($g \cdot min^{-1} \cdot cm^{-1}$);$Q_t$为测点输沙率($g \cdot min^{-1} \cdot cm^{-1}$)。

2.2.4 障内微地形测定 2019年春季风季后,采用插钎法对各类沙障组合布设沙丘的坡下、坡中上部位不同规格障内地表形态测定,各规格区选取3个障格作为重复实验对象。以障格为边界,以沙障原始高度并平行于沙面自建基准面,采用刚性铁网四周固定木桩为支撑保持水平,沿障格间隔5 cm进行等间距划分,在横纵交叉处插钎做标记,量取各交点到水平基准面的垂直距离D值,得到不同相对蚀积深度值H($H=H_0-D$,H_0为沙障高度),所测相对蚀积深度数据利用Surfer 15.3软件,选用克里金插值法,完成对地表形态的3D曲面模拟,并对障内不同相对蚀积深度范围所占格内面积进行计算。

3 结果与分析

3.1 不同沙障组合措施下的防风效能分析

防风效能是反映地表障碍物有效降低风速的重要指标,设置沙障能有效的起到降低地表风速的作用,而沙障材料、设障高度、孔隙度的差异是影响沙障防风效能的主要因素[29]。由于测定过程风速变化较大,本试验采用同时观测对照裸沙丘相应高度风速比值为基准,对4个高度风速效能进行比较,分析3种沙障材料组合措施下对地上不同高度处风速效能的影响情况。

从表1可以看出,3种沙障材料组合措施的防风效能最大值均出现在近地表0.1 m高度处,达到了80.29%,在2 m高度处风速效能降低,最大值仅为11.22%,且表现出随障格增大防风效能降低的趋势,这与以往有关研究中防风效能随高度增加、沙障规格增大而减少的变化趋势一致[30-31]。除0.5 m、2 m离地面较高处防风效能差异不显著外,近地表相同高度、同种规格下比较,整体上沙柳再生沙障的降低风速效能均比草绳沙障、PLA沙障措施下显著。

近地表0.1 m高度1 m×1 m规格下防风效能表

表1 3种沙障组合措施防风效能值

Tab. 1 Wind protection effectiveness value of three sand barrier measures

沙障组合类型	0.1 m处 防风效能/%	0.3 m处 防风效能/%	0.5 m处 防风效能/%	2 m处 防风效能/%
S1	80.29±4.17a	69.79±5.45a	29.18±2.85a	11.22±1.24a
P1	70.85±9.01b	65.40±8.49ab	28.57±4.91a	10.58±2.21a
C1	78.49±4.41a	61.67±9.33b	29.19±3.05a	10.83±1.42a
S3	63.05±3.16a	58.27±3.53a	26.21±1.81a	9.93±1.18a
P3	62.86±4.71a	58.14±4.79a	25.23±3.16a	9.96±1.41a
C3	59.68±3.79b	57.88±3.33a	25.38±1.91a	9.68±0.82a

注：同一列不同字母表示同一规格3种沙障措施下防风效能差异显著($P<0.05$)；同一列相同字母表示同一规格3种沙障措施下防风效能差异不显著($P>0.05$)。

现为：S1、C1防风效能相当，分别高于P1 9.8%、7.64%，3 m×3 m规格下S3防风效能最佳，但降低风速效能与P3差异不显著，两者分别高于C3 3.37%、3.18%。0.3 m高度1 m×1 m规格下同样表现为：S1防风效能最佳，P1次之，S1降低风速效能分别高于其他2种沙障措施4.39%、8.12%，虽然C1防风效能最差但与P1防风效能仅差3.73%，差异不显著，3 m×3 m规格下3种沙障措施下，随着风速高度和沙障规格的增加均表现出防风效能递减的趋势，且降低风速效能差异不显著。

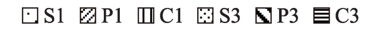
3.2 不同沙障组合措施下的阻沙效能分析

输沙量变化是表征地表风力蚀积的重要指标，可直观的反应不同下垫面的阻沙效益，也是衡量沙区沙害程度的重要指标之一[32]。

由图5可以看出，沙柳、PLA、草绳3类沙障组合措施下均有不同程度的降低近地表输沙率的作用，各类措施在不同坡位、各规格作用下的输沙量变化幅度分别介于46%~99%、12%~51%和10%~71%，平均值依次为：75%、35%和43%，输沙量降低率整体上表现为：沙柳>草绳>PLA。3种沙障材料措施下迎风坡输沙量降低率在沙丘各区域分布表现均为：中上坡高于下坡。同规格同坡位沙障间输沙量降低率平均值进行比较，1 m×1 m规格下，各部位均表现为：S1>C1>P1；3 m×3 m规格下，坡下输沙量降低率表现为：S3>P3>C3，随着坡位的增加，中上坡又表现出P3、C3差异不显著的现象。3类沙障材料措施下同坡位均呈随障格增大输沙量降低率降低的趋势，这与以往输沙量随障格规格变化趋势研究结果一致[33]。

3.3 不同沙障组合措施下的障内蚀积凹曲面特征

格状沙障不仅有阻挡外来风沙流的作用，对原有沙面还起到固定作用。在气流涡旋的长期作用下，使障格内原始沙面充分蚀积后可形成稳定凹曲面，是沙障地表蚀积、沙障效果最直观的表现[34]。而沙障材料、规格的差异性是导致凹曲面形成的主要因素。植被更新2 a后，各类沙障障内曲面特征图显示，不同沙障优化措施下，障内地形发生了明显变化，而且起伏形态因措施不同存在明显差异。



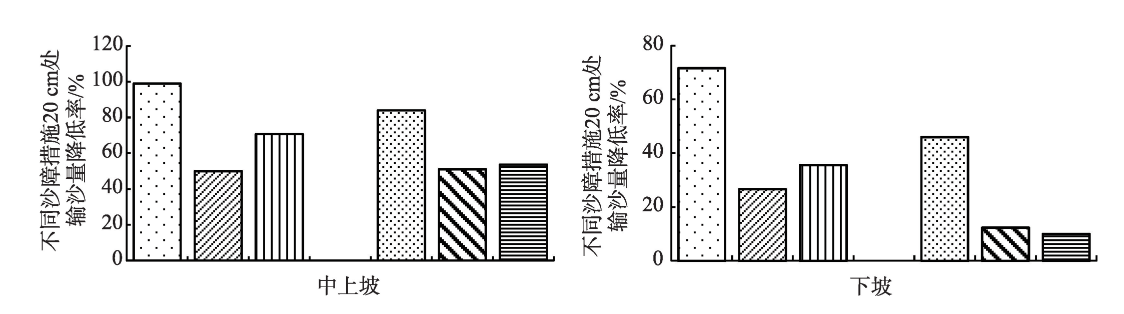


图5 不同类型下垫面各测点输沙量降低率

Fig. 5 Reduction rate of sediment transport at each measuring point on different types of underlying surface

根据不同沙障组合措施下障内相对蚀积深度分布状况与拟合凹曲面形态如图6、图7所示。6种规格沙障在设障撒播固沙植物种2 a后,格内蚀积差异明显,且呈现出因设障措施不同障内形态特征有明显差异。整体障内形态峰谷并存,沙柳沙障措施下侵蚀最低点出现在上风侧中间部位,四周沙障附近为沙粒阻滞沉积区,呈现为两侧高中间低的向风向开口的"簸箕"状凹曲面。PLA和草绳沙障措施侵蚀最低点均位于障格中心处,且N~NW~N方位的侵蚀明显大于S~ES~S方位,呈现出中心低周围高较规则的"漏斗状"凹曲面。同类沙障障格微形态整体相似,但不同坡位、不同规格之间,存在蚀积程度差异,造成坡下蚀积深度普遍深于中上坡,小规格障内凹曲面相对平缓,但大规格障内存在凹凸不平,中心与周围蚀积深度差异较大现象。

由表2可知,各类沙障措施整体表现为侵蚀大于堆积,坡下相对侵蚀深度、侵蚀面积均大于中上坡的现象。其中C3相对侵蚀面积最大,坡中上、坡

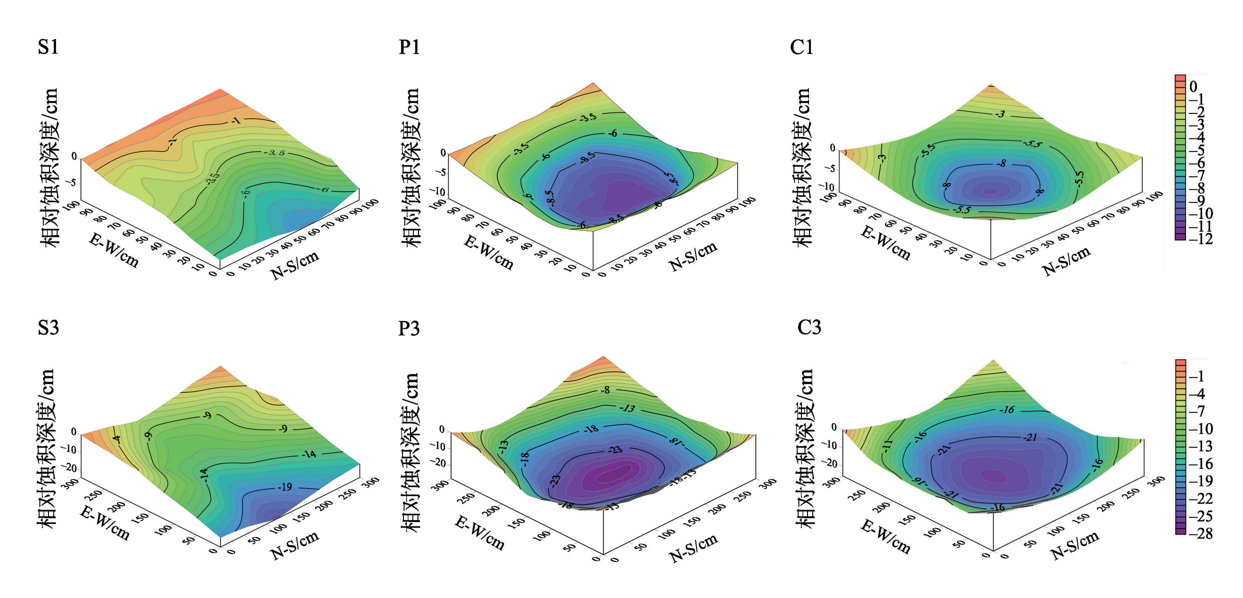


图6　中上坡不同沙障措施下相对蚀积深度分布与凹曲面形态

Fig. 6 Relative distribution of erosion and depositional depth and concave surface shape under different sand barrier measures on the middle and upper slope

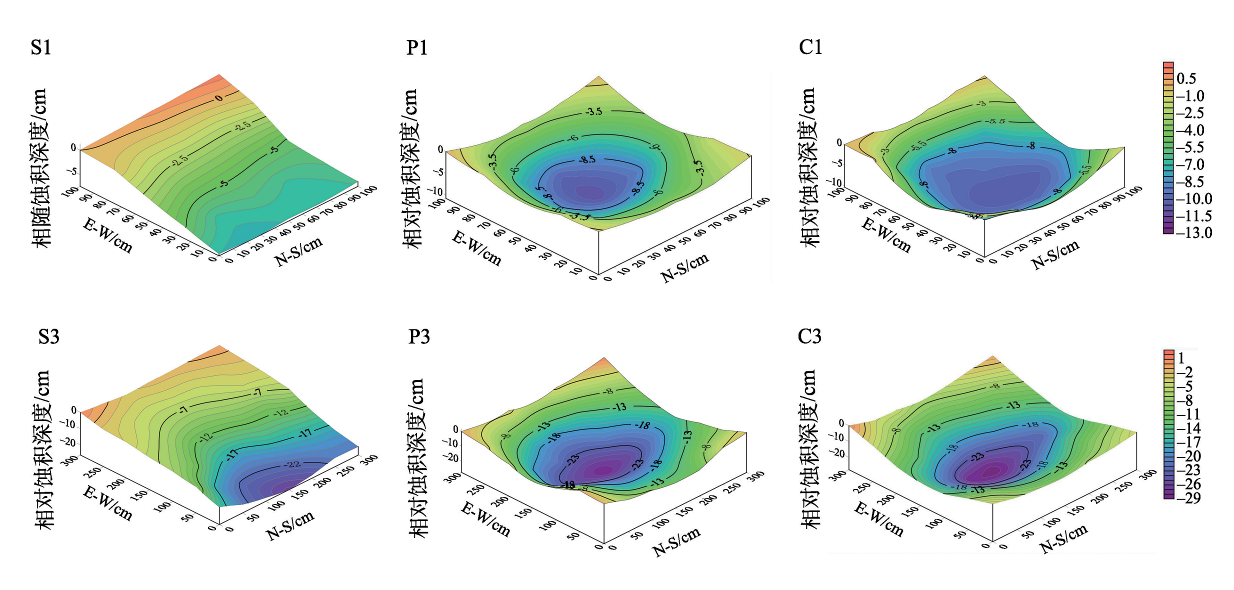


图7　下坡不同沙障措施下相对蚀积深度分布与凹曲面形态

Fig. 7 Relative distribution of erosion and depositional depth and concave surface shape under different sand barrier measures downhill slope

表2 不同相对蚀积深度范围的格内面积百分比

Tab.2 Area percentage of different ranges of relative erosion and deposition depth in each checkerboard

		相对蚀积深度范围分组/%								
坡位	规格	-30~-25 cm	-25~-20 cm	-20~-15 cm	-15 ~ -10 cm	-10~-5 cm	-5~0 cm	0~5 cm	5~10 cm	10~15 cm
坡中上	S1	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	33.33	36.11	8.33	0.00
	P1	0.00	0.00	0.00	11.11	55.56	19.44	16.67	0.00	0.00
	C1	0.00	0.00	0.00	2.78	13.89	30.56	27.78	25.00	0.00
	S3	0.00	3.52	9.77	15.23	17.97	17.97	12.89	13.28	8.59
	P3	4.76	15.87	22.22	6.35	17.46	19.05	14.29	0.00	0.00
	C3	15.63	26.56	25.00	17.19	9.38	3.13	3.13	0.00	0.00
坡下	S1	0.00	0.00	0.00	0.00	32.00	28.00	40.00	0.00	0.00
	P1	0.00	0.00	0.00	2.78	25.00	61.11	13.89	0.00	0.00
	C1	0.00	0.00	0.00	5.56	47.22	22.22	13.89	8.33	2.78
	S3	2.47	11.11	12.35	14.81	17.28	18.52	14.81	7.41	6.17
	P3	10.94	7.81	15.63	15.63	18.75	12.50	4.69	9.38	4.69
	C3	19.44	29.17	31.94	8.33	1.39	6.94	4.17	0.00	0.00

下分别达到96.88%和97.22%。

坡中上部，沙柳沙障组合措施下，S1障内曲面略有起伏，蚀积深度范围在-10~10 cm之间，最低点距沙面7.9 cm，69.44%的相对蚀积深度面积分布在-5~5 cm之间。S3障内起伏明显增大，蚀积深度范围延伸至-25~15 cm之间，-10~0 cm区组深度范围面积占比最大，达35.94%，障内最低点呈顺风向下移动的趋势，最低点距沙面深度增加至23.7 cm。PLA和草绳沙障组合措施下，P1、C1蚀积深度范围均分布在-15~10 cm之间，较S1深度范围略有增加，P1中-10~-5 cm的蚀积深度分布达55.56%，C1中-5~5 cm的蚀积深度分布范围也在50%左右，且P1、C1相对蚀积深度分别达10.4 cm、10.3 cm。P3、C3随着障格的增加均表现出蚀积深度范围和相对蚀积深度增加的现象，蚀积深度范围扩大到-30~5 cm，最低点深度分别达27.5 cm、25.2 cm，其中C3中-25~15 cm区组深度范围面积占比达51.56%，相对几种措施下最不光滑，地表起伏波动最大。

下坡部位，S1、P1、C1中P1相对侵蚀面积最大，仅-5~0 cm蚀积深度范围面积占比达61%，C1次之，S1侵蚀面积占比最小，且S1最大蚀积深度范围40%分布在0~5 cm之间，呈现出弱堆积状态，最低点距沙面深度分别为8.7 cm、10.7 cm和10.4 cm。S3、P3、C3表现出与坡中上部位随规格增加蚀积深度范围和相对蚀积深度均增加的相同规律，除C3外另两类各深度区组面积占比分布较均匀，障内相对较平滑，C3相对侵蚀面积占比最大，-25~-15 cm区组深度范围面积占比达61.66%。

4 讨 论

沙障加以固沙植物种的优化措施改变了流动沙丘表面的物理结构特征，可再生沙柳沙障、PLA沙障和草绳沙障措施下均能起到有效的降低地表风速和阻沙的效果，所有处理平均风速和输沙量均低于流动沙丘对照。3种沙障材料优化措施下具有疏透性的直立式沙柳再生沙障对气流具有较强的累加降低效应，而草绳和PLA沙障障高较低矮、表面光滑，且孔隙度密实，使得过境气流仍然保持过障后抬升加速的规律继续向前运行。这与以往[35-37]对不同材质的沙障研究中，防风固沙效果主要取决于其结构差异的结论相一致。在1 m×1 m较小规格中，易在障内形成小区域涡流，形成不稳定风速，随着障格增大和所测风速高度位置的增加这种现象逐渐减小。刘晓波[38]也认为，沙障规格越大，影响近地表的风速能力越小，风沙流对地表的侵蚀作用越强。同时，不同沙障优化措施的固沙阻沙效果在沙丘不同区域之间存在差异，沙柳沙障由于其再生萌蘖性，能有效消减风的搬运能力，且随着坡位的增加、风速的增强，积沙范围延伸较远，表现出较稳定的降低输沙量的特性。PLA、草绳沙障由于障高低于风沙运动蠕移层，且为紧密型材料，在气流流

速较低的坡下虽能起到固沙作用,但随着坡位的增加,当较强输沙气流通过沙障时,一部分夹沙气流受不透风障碍物的阻挡被迫抬升,使障体高度以下通过的气流大幅减少,风速迅速降低,同时由于障格的影响,使得气流的活动层被抬高,相应输沙量也被提升至一个新高度,导致PLA、草绳沙障地表输沙率的加大,均表现出较不稳定的阻沙效果。两者相比较由于制作工艺不同,草绳沙障表面较PLA沙障粗糙,1 m×1 m较小规格下能表现出较优于PLA沙障的阻沙效果,但随着障格的增加这种优势也趋于减小。综合沙障组合防风效能和输沙量分析结果,沙柳再生沙障组合效果最佳,且防风效应和阻沙效果两者之间基本呈正相关关系。1 m×1 m规格的PLA、草绳沙障组合,适宜布设于沙丘迎风坡坡底,这与袁立敏等[15]在乌兰布和沙漠地区的实验结论相吻合。但在选用小规格活植物体沙障固沙,还需要避免因规格过小,密度过大造成对固沙植物的后期更新生长影响[39]。

流场结构和风沙流结构之间的互馈作用[40-41]促使沙丘表面发生侵蚀或堆积,导致地表形态发生变化,障格凹曲面的形成受盛行风向、防护材料,沙障规格等影响存在差异,是人工固沙体系防护效果最直观的体现。毛乌素沙地乌审旗沙区,沙柳再生沙障、PLA沙障、草绳沙障与固沙植物种的优化组合模式下,同种沙障材料措施下在沙丘不同区域呈相似形态。沙柳再生沙障优化措施下当气流通过具有一定孔隙度的障体时,对截留挟沙气流包含的不同粒度沙物质有一定的过滤作用,使部分沙粒得以沉降,下风向障体周围产生少量堆积,加之障内固沙植物种的累加固沙作用,整体呈弱蚀积状态。而PLA、草绳2种沙障因材质紧密,积沙范围较窄,可能存在非均匀水平涡流,致使障格中心周围侵蚀严重,撒播植物种也因风蚀保存率较低,且实地观测上风向沙障沙埋现象严重,阻沙作用大大降低。蚀积深度范围效应也因障格的增大,障内中心距障体距离也随之增大,气流速度较强,致使地表形态相对趋于不规整,蚀积面积和蚀积深度逐渐增加,这与张登山等[42-43]对不同规格麦草方格沙障蚀积效应变化趋势、以及可降解纤维沙障凹曲面稳定性研究结果一致。

障内蚀积特征显示,不同类型沙障优化措施下沙丘地表均以受到侵蚀为主。对比输沙量降低率与相对蚀积深度范围结果,可能是由于下坡部位处于丘间低地过渡带,伴有少量植被生长,加之采取沙障配以固沙植物种的优化措施,障内植被随之而生,使得沙丘固定下的植被恢复速率加快,导致下坡部位沙源不够充足,障内地表长期受到侵蚀后沙物质不能得以补充,最终出现下坡侵蚀量高于中上坡的现象,二者呈非正相关关系。王丽英等[44]也认为,设障沙丘不同部位的防风效应以丘间低地防风效应最大。以往沙障工程效果的好坏、沙障材料及规格的筛选均以布设沙障控制风速和阻沙效果为评价指标[45-47]。而笔者认为,人工建立固沙植被体系一段时间后的障内地表蚀积特征是客观考量工程措施优劣的最直接体现,在今后应用过程中,必须要对各指标独立分析,再建立相关联系,才能客观公正的评价出最适合的工程措施。再者,本实验沙障布设方法以及固沙植物种的选择均以该地区林业重点工程成效应用为参考,在沙障材料和固沙植物种对流沙适应性选择上具有局限性,而植被重建后对土壤的长效影响、固沙植物种的优化选择以及流沙固定重建稳定后的生态效益评价有待进一步研究。

5 结 论

沙障配以固沙植物种组合措施下的防风阻沙效益,因沙障材料、规格、布设位置不同产生不同程度的差异,通过试验结果的分析讨论,得出以下结论。

(1) 1 m×1 m沙柳再生沙障组合措施降低风速效能最优,3 m×3 m草绳、PLA组合措施效能相当且表现较差。

(2) 沙柳再生沙障组合措施下阻沙效应较强且稳定,1 m×1 m规格下,草绳沙障组合措施较优于PLA沙障组合措施,但随着障格的增大在不同坡位间表现不稳定。

(3) 各类沙障组合措施下障内微地形主要受NW~NNW风向控制,在相类似区域开展防沙治沙工程布设沙障时,应考虑当地主风方向,格状沙障设置应以一个障边走向与主风方向垂直或夹角稍大于90°为宜。

(4) 草绳、PLA2种沙障组合措施下均表现出由N~NW~N弱风蚀方位带向障格中心强侵蚀区变化

的相似形态,且在坡位间障内形态差异不明显。

(5)坡下相对侵蚀深度范围较大,且同种沙障材料下大规格较为明显。3 m×3 m草绳沙障措施下坡上、坡下相对侵蚀面积分别达96.88%和97.22%,在几类沙障措施下相对侵蚀面积最大。

(6)沙柳再生格状沙障配以当地固沙植物种优化措施障内形态较稳定,防护期较长,可实现初期快速固定,后期稳定持续的固沙植被特征。后期平茬利用宜可提供大量饲草料,较单一机械沙障更能提升综合治理的效能。

参考文献(References):

[1] 姚正毅, 陈广庭, 韩致文, 等. 机械防沙体系防沙功能的衰退过程[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 226-231. [Yao Zhengyi, Chen Guangting, Han Zhiwen, et al. Decline mechanism and process of mechanical defense system[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(2): 226-231.]

[2] 李滨生. 治沙造林学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1990: 150-198. [Li Bingsheng. Afforestation and Desertification Control[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1990: 150-198.]

[3] 顿耀权, 屈建军, 康文岩, 等. 包兰铁路沙坡头段防护体系研究综述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 66-74. [Dun Yaoquan, Qu Jianjun, Kang Wenyan, et al. Progress and prospect of research on the protective system of Shapotou section of the Baotou-Lanzhou Railway[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3): 66-74.]

[4] 董智, 刘永茂, 白凤武. 杭锦旗穿沙公路综合防治技术及其效益研究[J]. 内蒙古林学院学报, 1999, 2(2): 19-24. [Dong Zhi, Liu Yongmao, Bai Fangwu. Research on the technique and effects of comprehensive control drift sand for crossed desert highway of Hangjin league[J]. Journal of Neimenggu Forestry College, 1999, 2(2): 19-24.]

[5] 高永, 邱国玉, 丁国栋, 等. 沙柳沙障的防风固沙效益研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 365-370. [Gao Yong, Qiu Guoyu, Ding Guodong, et al. Effect of *Salix psammophila* checkerboard on reducing wind and stabilizing sand[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(3): 365-370.]

[6] 高永, 虞毅, 龚萍, 等. 沙柳沙障[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 10-220. [Gao Yong, Yu Yi, Gong Ping, et al. *Salix psammophila* Sand Barrier[M]. Beijing: Science Press, 2013: 10-220.]

[7] 刘姝颖, 李宁, 陆小辉. 草方格在防风固沙工程中的应用[J]. 辽宁林业科技, 2014, 1(3): 67-68. [Liu Shuying, Li Ning, Lu Xiaohui. Application of grass square grid in wind and sand control project[J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2014, 1(3): 67-68.]

[8] 曹晓明. 草绳沙障的设置与推广应用[J]. 中国水土保持, 2017, 1(11): 53-60. [Cao Xiaoming. Installation and application of grass rope sand barriers[J]. Soil and Water Conservation in China, 2017, 1(11): 53-60.]

[9] 常兆丰, 仲生年, 韩福贵, 等. 粘土沙障及麦草沙障合理间距的调查研究[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 455-457. [Chang Zhaofeng, Zhong Shengnian, Han Fugui, et al. Research of the suitable row spacing on clay barriers and straw barriers[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(4): 455-457.]

[10] 朱震达, 赵兴梁, 凌裕泉, 等. 治沙工程学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998: 96-116. [Zhu Zhenda, Zhao Xingliang, Ling Yuquan, et al. Engineering Science of Desert Controlling[M]. Beijing: China Environmental Press, 1998: 96-116.]

[11] 李瑞军. 棉秆沙障防风固沙效益比较[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009. [Li Ruijun. Comparative Wind Prevention and Sand-fixation Efficiency of Cotton Haulm Sand Barrier[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2009.]

[12] 蒙仲举, 任晓萌, 高永. 低立式纤维沙袋沙障防风固沙效益研究[J]. 水土保持, 2014, 21(2): 294-301. [Meng Zhongju, Ren Xiaomeng, Gao Yong. Effect of the low-fiber sandbag sand-barrier on wind-breaking and sand-fixation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(2): 294-301.]

[13] 王翔宇, 丁国栋, 高函, 等. 带状沙柳沙障的防风固沙效益研究[J]. 水土保持, 2008, 22(2): 42-46. [Wang Xiangyu, Ding Guodong, Gao Han, et al. Effect of zonal willow *Salix psammophila* checkerboard on reducing wind and stabilizing sand[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 42-46.]

[14] 周丹丹. 生物可降解聚乳酸(PLA)材料在防沙治沙中的应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009. [Zhou Dandan. A Study on the Application of Biodegradable Polylactic Acid (PLA) Material for Combating Desertification[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009.]

[15] 袁立敏, 高永. PLA沙障防风效益研究[J]. 内蒙古林业科技, 2010, 36(3): 14-18. [Yuan Limin, Gao Yong. Windbreak effect of PLA sand barrier[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2010, 36(3): 14-18.]

[16] 周丹丹, 虞毅, 胡生荣, 等. 沙袋沙障凹曲面特征研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 22-29. [Zhou Dandan, Yu Yi, Hu Shengrong, et al. Concave surface characteristics of sandbag sand barrier[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 22-29.]

[17] 祁延录. 南疆戈壁区机械防沙措施阻沙效益的风洞测试研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 12(4): 892-899. [Qi Yanlu. Protection benefits of mechanical sand control measures in Gobi district, southern Xinjiang[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 12(4): 892-899.]

[18] 周娜, 张春来, 田金鹭, 等. 半隐蔽式草方格沙障凹曲面形成的流场解析及沉积表征[J]. 地理研究, 2014, 33(11): 2145-2156. [Zhou Na, Zhang Chunlai, Tian Jinlu, et al. Flow field controlling the concave surface of the semi-buried checkerboards and its characterization by grain sizes of sediments[J]. Geographical Research, 2014, 33(11): 2145-2156.]

[19] 席成, 左合君, 王海兵, 等. 高立式尼龙网沙障防风阻沙特征及其合理配置[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 882-889. [Xi Cheng, Zuo Hejun, Wang Haibing, et al. Wind-proof and sand-blocking characteristics of high vertical nylon mesh sand barrier and its rational allocation[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 882-889.]

[20] 朱鹏. 基于风洞模拟的沙区公路双排沙障设置模式优选[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. [Zhu Peng. Optimization of Double Row Sand Barrier Setting Mode for Highway in Sand Area Based on Wind Tunnel Simulation[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.]

[21] 张凯, 王起才, 杨子江, 等. 新建格库铁路HDPE板高立式沙障防风效益数值模拟研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 169-175. [Zhang Kai, Wang Qicai, Yang Zijiang, et al. Research on numerical simulation on wind protection benefits of HDPE panels with high vertical sand barrier in the newly-built Golmud-korla Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 169-175.]

[22] 张帅, 丁国栋, 高广磊, 等. 不同年限的草方格沙障对生态恢复的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(5): 13-18. [Zhang Shuai, Ding Guodong, Gao Guanglei, et al. Effects of straw checkerboard barrier in different setting years on ecological restoration[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(5): 13-18.]

[23] 赵丽娅, 高丹丹, 熊炳桥, 等. 科尔沁沙地恢复演替进程中群落物种多样性与地上生物量的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4109-4116. [Zhao Liya, Gao Dandan, Xiong Bingqiao, et al. Relationship between the aboveground biomass and species diversity of sandy communities during the process of restoring succession in the Horqin Sandy Land, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (12): 4109-4116.]

[24] 任余艳, 胡春元, 贺晓, 等. 毛乌素沙地巴图塔沙柳沙障对植被恢复作用的研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 17-19. [Ren Yuyan, Hu Chunyuan, He Xiao, et al. The influence of *Salix* sandy barrier to vegetation restoration in sandy region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(2): 17-19.]

[25] 周丹丹, 胡生荣, 韩敏, 等. 沙柳沙障内植被恢复影响因子探究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 119-112. [Zhou Dandan, Hu Shengrong, Han Min, et al. Research into the vegetation restoration influencing factor of *Salix psammophila* checkerboard[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(6): 119-112.]

[26] 胡春元, 杨茂, 杨存良, 等. 库布齐沙漠穿沙公路沙害综合防治技术[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(3): 71-77. [Hu Chunyuan, Yang Mao, Yang Cunliang, et al. Integrated techniques of sandy damage control for the crossing highway of crossing Kubuqi Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16 (3): 71-77.]

[27] 包岩峰, 丁国栋, 吴斌, 等. 毛乌素沙地风沙流结构的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(2): 118-123. [Bao Yanfeng, Ding Guodong, Wu Bin, et al. Study on the wind-sand flow structure in Mu Us sandy land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(2): 118-123.]

[28] 罗凤敏, 高君亮, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘起沙风风况及输沙特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 145-1152. [Luo Fengmin, Gao Junliang, Xin Zhiming, et al. Characteristics of sand- driving wind regime and sediment transport in northeast edge of Ulan Buh Desert[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 145-1152.]

[29] 李红悦, 哈斯额尔敦. 机械沙障固沙效应及生态效用的研究综述[J]. 北京师范大学学报, 2020, 56(1): 63-67. [Li Hongyue, Hasi Eerdun. Sand-fixing effect and ecological effect of mechanical sand barriers: a review[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(1): 63-67.]

[30] Qiu Guoyu, Lee In- Bok, Shimizu Hideyuki, et al. Principles of sand dune fixation with straw checkerboard technology and its effects on the environment[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 56(3): 449-451.

[31] Zhang Chunlai, Li Qing, Zhou Na, et al. Field observations of wind profiles and sand fluxesabove the windward slope of a sand dune before and after the establishmentofsemi- buried straw checkerboard barriers[J]. Aeolian Research, 2016, 20(1): 59-70.

[32] Mctainsh G H, Lynch A W, Tews E K. Climatic controls upon dust storm occurrence in eastern Aust ralia[J]. Journal of Arid Environments, 1998, 39(1): 457-466.

[33] 张克存, 屈建军, 董治宝, 等. 格状沙障内风速波动特征初步研究[J]. 干旱区研究, 2006, 23(1): 95-99. [Zhang Kecun, Qu Jianjun, Dong Zhibao, et al. Preliminary research on fluctuation characteristics of wind speed over checkerboard sand barriers[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(1): 95-99.]

[34] 屈建军, 凌裕泉, 俎瑞平, 等. 半隐蔽格状沙障的综合防护效益观测研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 329-335. [Qu Jianjun, Ling Yuquan, Zu Ruiping, et al. Study on comprehensive sand-protecting efficiency of semi-buried checkerboard sand-barriers[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(3): 329-335.]

[35] Bofah K K, Al-Hinai K G, Field tests of porous fences in the regime of sand-laden wind[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1986, 23(1): 309-319.

[36] 王自龙. 民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流的观测研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009. [Wang Zilong. Study on Wind-sand Flow under Different Underlying Surface Conditions of Minqin Oasis External[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2009.]

[37] 朴起亨. 几种不同材料机械沙障防风效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010. [Piao Qiheng. Effects of Different Sand Barriers on Wind- break and Sand Fixation[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.]

[38] 刘晓波. PLA沙袋格状沙障的合理运用[J]. 内蒙古林业调查设计, 2012, 35(5): 46-47, 71. [Liu Xiaobo. Rational application of PLA sand- barrier[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2012, 35(5): 46-47, 71.]

[39] 刘瑛心. 试论我国沙漠地区植物区系的发生与形成[J]. 植物分类学报, 1995, 33(2): 131-141. [Liu Yingxin. A study on origin

and formation of the Chinese desert floras[J]. Acta Phytotaxonomica Sinica, 1995, 33(2): 131–141.]

[40] 王振亭, 郑晓静. 草方格沙障尺寸分析的简单模型[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 229- 232. [Wang Zhenting, Zheng Xiaojing. A simple model for calculating measurements of straw checkerboard barriers[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(3): 229–232.]

[41] 屈建军, 凌裕泉, 井哲帆, 等. 包兰铁路沙坡头段风沙运动规律及其与防护体系的相互作用[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 529–533. [Qu Jianjun, Ling Yuquan, Jing Zhefan, et al. Interaction between sand blown activity and protection system in Shapotou section of Baotou- Lanzhou Railway[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(4): 529–533.]

[42] 张登山, 吴汪洋, 田丽慧, 等. 青海湖沙地麦草方格沙障的蚀积效应与规格选取[J]. 地理科学, 2014, 34(5): 627–633. [Zhang Dengshan, Wu Wangyang, Tian Lihui. et al. Effects of erosion and deposition and dimensions selection of straw-checkerboard barriers in the desert of Qinghai Lake[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(5): 627–633.]

[43] 党晓宏, 高永, 虞毅, 等. 可降解纤维沙障控制风蚀沙埋的作用规律[J]. 科技通报, 2015, 31(5): 41– 52. [Dang Xiaohong, Gao Yong, Yu Yi, et al. The affect law on the degradable fiber checkerboard control of wind erosion and sand bury[J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(5): 41–52.]

[44] 王丽英, 李红丽, 董智, 等. 沙柳方格沙障对库布齐沙漠防风固沙效应的影响[J].水土保持学报, 2013, 27(5): 115–118. [Wang Liying, Li Hongli, Dong Zhi, et al. Effect of *Salix psammophila* checkerboard sand barrier on wind prevention and sand resistance in Kubuqi Desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5): 115–118.]

[45] 王睿, 周立华, 陈勇, 等. 库布齐沙漠机械防沙措施的防护效益[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 330–336. [Wang Rui, Zhou Lihua, Chen Yong, et al. Wind-blown sand control effect of sand barriers used in the Hobq Desert[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 330–336.]

[46] 李雪琳, 马彦军, 马瑞, 等. 不同带宽的防风固沙林流场结构及防风效能风洞实验[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 40–48. [Li Xuelin, Ma Yanjun, Ma Rui, et al. Effects of simulation tree bandwidth and seasonal on wind flow field in wind tunnel[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(5): 40–48.]

[47] 梁柯鑫, 王起才, 崔晓宁, 等. 格库铁路不同固沙措施的防护效益[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 300–306. [Liang Kexin, Wang Qicai, Cui Xiaoning, et al. An analysis of protection benefits of different sand- fixing measures at Geku Railway[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 300–306.]

Benefit evaluation of wind prevention and sand fixation under the combined measures of sand barrier in mobile dunes in Mu Us sandy land

SHI Lin[1], LI Hongyue[2], ZHAO Yuxing[1], REN Yuyan[1], HE Jinjun[1], YU Fengqaing[3], Eerdun Hasi[4]

(1. Ordos Research Institute of Forestry and Grassland Science, Ordos 017010, Inner Mongolia, China; 2. Beijing Guangqumen Middle School, Beijing 100001, China; 3. Ordos forestry and Grassland Development Center, Ordos 017010, Inner Mongolia, China; 4. School of Natural Resources, Faculty of Geographic Sciences Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The benefits of wind and sand control under the combined measures of sand-fixing plant species with regenerative sand barriers of *Salix mongolica*, polylactic acid (PLA) sandbags, and straw rope sand barriers in the Mu Us sandy land was studied. The wind speed, near-surface sand transport, and erosion pattern inside the barrier were measured at different heights under various combinations of measures, and the benefits of several sand barrier and combined measures under different materials, slope positions, and specifications were compared and analyzed. The results showed wind speed reduction was highest for the 1 m × 1 m *S. mongolica* regenerative sand barrier and straw rope sand barrier (up to 80.29% and 78.49%). The effectiveness of wind prevention for the 3 m × 3 m combination of straw rope and PLA sand barriers was 58.14% and 57.88%, respectively. The reduction rate of sand transport was as follows: *S. mongolica* > straw rope > PLA, and the trend increased with the specification. The sand-blocking effect of *S. mongolica* regeneration sand barrier combined measures is more stable, while the other two measures are less stable. The microtopography inside the barrier is mainly controlled by the wind direction from NW to NNW under various measures, and the morphological characteristics varies with the type of sand barrier material. The overall erosion is dominant, and the relative depth of erosion in the barrier is the largest for straw rope sand barriers combination, and the PLA barrier is the next, and the *S. mongolica* regeneration sand barrier is weakly eroded in the range of −10−5 cm, but the relative depth of erosion decreases with the increase of specification and slope. Comprehensive analysis shows that the artificial sand fixation vegetation system of *Salix mongolica* sand barrier combined with sowing sand fixation plant species is the most stable, with the best benefit of wind prevention and sand fixation, and is a more suitable mobile sand dune sand barrier in Mu Us sandy land. It is a more suitable technical measure for flowing dune sand barriers to promote vegetation restoration in Mu Us sandy land. The other measures can be appropriately adopted according to the difficulty of obtaining sand barrier materials, transportation conditions, quicksand environment, and control.

Keywords: mobile dune; sand barrier; combined measures; windbreak and sand fixation; Mu Us sandy land